

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva

Šíření kouře v tunelu

Student: Břeská Pavla

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Bohdan Filipi, PhD.

Studijní obor: Technika požární ochrany a bezpečnost průmyslu

Datum zadání bakalářské práce: říjen 2007

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.4.2008

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně.“

V Ostravě 30.4.2008

Břeská Pavla

ANOTACE

BŘESKÁ, Pavla. *Šíření kouře v tunelu*. Ostrava, 2008. 35 s. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství.

Bakalářská práce se zabývá problematikou šíření kouře v tunelu. V úvodní části je popsán vznik kouře, jeho složení, vlastnosti a rizika s kouřem spojená. Následující kapitoly popisují tunel z hlediska jeho konstrukce, vybavení, možnosti vzniku požáru a pohyb kouře v tunelu při požáru. Uvedeny jsou i významné požáry v tunelech. Závěr je věnován požárním zkouškám a metodám měření kouře.

Klíčová slova: kouř, zplodiny hoření, tunel, šíření kouře, videodetekce

ANNOTATION

BŘESKÁ, Pavla. *Smoke spread in tunnel*. Ostrava, 2008. 35 p. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of safety engineering.

The bachelor thesis deals with the problems of smoke spread in the tunnel. At the beginning there is a description of the origin of the smoke, its structure, characteristics and hazards connected with it. Following chapters describe a tunnel in terms of construction, equipment, possibility of the birth of a fire and movement of smoke in the tunnel during the fire. The most important fires in tunnels are mentioned. Conclusion is devoted to fire tests in tunnels and methods of measuring of smoke.

Key words: smoke, combustion gases, smoke spread, tunnel, videodetection

OBSAH

ÚVOD.....	1
REŠERŠE	2
1 KOUŘ, VZNIK A SLOŽENÍ	3
1.1 ZÁKLADY HOŘENÍ.....	3
1.2 VZNIK KOUŘE	3
1.3 VLASTNOSTI KOUŘE	4
1.3.1 Složení kouře	5
1.3.2 Optická hustota kouře	5
1.3.3 Barva a zápach kouře.....	5
2 RIZIKA SPOJENÁ S KOUŘEM.....	6
2.1 KOROZIVITA KOUŘE	6
2.2 SNÍŽOVÁNÍ OBSAHU KYSLÍKU	6
2.3 ZPLODINY HOŘENÍ	7
2.3.1 Rozdělení zplodin hoření.....	7
2.3.2 Toxicita zplodin hoření.....	8
2.3.3 Hořlavost zplodin hoření.....	12
2.4 ZTRÁTA ORIENTACE.....	14
3 SPECIFICKÉ PODMÍNKY V TUNELECH.....	15
3.1 CHARAKTERISTIKA SILNIČNÍCH TUNELŮ.....	15
3.2 VĚTRÁNÍ TUNELU	16
3.3 POŽÁR V TUNELU	17
3.3.1 Silniční tunely.....	17
3.3.2 Železniční tunely.....	18
3.3.3 Metro.....	19
4 ŠÍŘENÍ KOUŘE V TUNELU	20
4.1 STRATIFIKACE KOUŘE V TUNELU	20
4.2 MNOŽSTVÍ VYVÍJENÉHO KOUŘE.....	21
5 KONKRÉTNÍ PŘÍPADY POŽÁRŮ V TUNELECH	23
5.1 CHANNEL TUNNEL (1996)	23
5.2 MONT BLANC TUNNEL (1999).....	23
5.3 TAUERNSKÝ TUNEL (1999).....	24
5.4 KAPRUN (2000)	25
6 MOŽNOSTI SLEDOVÁNÍ ŠÍŘENÍ KOUŘE V TUNELU.....	26

6.1	VIDEOZÁZNAM	27
6.1.1	<i>Záznam videosekvencí</i>	27
6.1.2	<i>Videodetekce</i>	27
6.2	LASEROVÉ ANEMOMETRY	28
6.2.1	<i>Princip metody</i>	28
6.3	FOTOMETRICKÉ MĚŘENÍ KOUŘE	30
6.4	VÝSLEDKY REÁLNÝCH ZKOUŠEK	30
6.4.1	<i>Požární zkoušky v tunelu Valík</i>	30
6.4.2	<i>Požární zkouška v tunelu Mrázovka</i>	31
7	ZÁVĚR	33
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34

ÚVOD

Kouř je hlavním rizikem pro osoby zasažené nebo ohrožené požárem. Většina úmrtí při požárech je způsobena otravou toxickými zplodinami nebo udušením z nedostatku kyslíku v ovzduší. Riziko je vyšší jedná-li se o požár v uzavřeném prostoru, mezi které musíme zahrnout i tunely.

K nehodám v tunelech s následným požárem dochází podle statistik méně často než na otevřených komunikacích, ale následky požáru v tunelu mívají mnohem katastrofálnější následky. Nejsou ohroženy jen osoby, kterých se nehoda týká, ale i ostatní účastníci dopravy nacházející se právě v tunelu. Hlavním nebezpečím představuje kouř, jehož šíření je ovlivněno požární ventilací. Při jejím nesprávném nasazení může mít požár katastrofální následky, jak tomu bylo například při požáru kamionu v tunelu *Mont Blanc* v roce 1999.

Na tunely jsou kladeny velké bezpečnostní požadavky. Jedním z požadavků je provádění požárních zkoušek před uvedením tunelu do provozu. Hlavním cílem zkoušek je ověření funkčnosti větracího systému, systému požární signalizace apod. Při požárních zkouškách se sleduje rychlost vývinu tepla, systém větrání, šíření kouře, koncentrace zplodin hoření aj. Poznatky z požárních zkoušek se stejně jako poznatky z požárů, ke kterým v minulosti došlo prakticky využívají v navrhování zabezpečení v tunelech.

Cílem bakalářské práce je zhodnocení šíření kouře v tunelu a uvedení metod, kterými je možné šíření kouře sledovat a zaznamenávat.

REŠERŠE

BEARD, Alan, CARVEL, Richard. *The handbook of tunnel fire safety*. 1st edition. London : Thomas Telford publishing, 2005. 514 s. ISBN 0 7277 3168 8.

Jedná se o obsáhlou knihu, která se zabývá požární bezpečností tunelů. Publikace je rozdělená do pěti částí – Reálné požáry v tunelech, Prevence a ochrana, Dynamika požáru v tunelu, Požárně bezpečnostní management a lidské faktory a Záchranné postupy. Autoři jednotlivých kapitol jsou odborníci v oblasti požární ochrany specializující se na požární bezpečnost tunelů. Pro bakalářskou práci jsem z publikace čerpala hlavně informace o stratifikaci kouře v tunelu a použila informace o reálných požárech, ke kterým v tunelech došlo.

PŘIBYL, Pavel, JANOTA, Aleš, SPALEK, Juraj. *Analýza a řízení rizik v dopravě : Tunely na pozemních komunikacích a železnici*. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2008. 528 s. ISBN 978-80-7300-214-5

Jedná se o publikaci, která informuje o problematice tunelů z hlediska bezpečnosti a všeho co s uvedenou problematikou souvisí. Kniha je rozdělena do dvanácti kapitol. Čerpala jsem hlavně z kapitoly věnující se významným katastrofám v tunelech, modelům rizikových situací v tunelu, fyzikálnímu popisu požáru a videodetekcí kouř.

1 KOUŘ, VZNIK A SLOŽENÍ

Požár je nežádoucí hoření, při kterém dochází k usmrcení nebo zranění osob nebo zvířat, ke škodám na materiálních hodnotách nebo životním prostředí nebo nežádoucí hoření při kterém byly osoby, zvířata, materiální hodnoty a životní prostředí bezprostředně ohroženy [13].

Požár je souborem fyzikálně chemických dějů, se kterými probíhají nestacionární změny teplot a hmoty. Pro všechny požáry je typické, že se uvolňuje tepelná a světelná energie. [3] Kromě uvolňování tepla a světla je požár provázen vznikem kouře, jehož součástí jsou zplodiny hoření, které mohou být nebezpečné pro lidský organismus.

1.1 Základy hoření

Hoření vzniká a probíhá za určitých podmínek. K tomu je potřebná přítomnost hořlavé látky (palivo), oxidačního prostředku (vzduch, kyslík) a energie (zdroj zapálení). [12]

Hoření je relativně rychlý řetězový autokatalytický reakční mechanismus spojený s uvolněním tepelné energie, který může být provázen výrazným světelným efektem. [13]

Hoření jako heterogenní reakce představují složitou soustavu dějů, skládající se z dílčích článků [13]:

- Difuze látek k mezifázovému rozhraní
- Zachycení látek (adsorpce) na mezifázovém rozhraní
- Chemická reakce
- Uvolnění produktů (desorpce) z mezifázového rozhraní
- Difuze produktů od mezifázového rozhraní

Rozvoj reakcí hoření je složitá soustava dějů, které se mohou vzájemně ovlivňovat. Bez přihlédnutí k výměně tepla, termickým a hydrodynamickým podmínkám, lze z kinetického hlediska konstatovat, že vlastní rozvoj reakcí hoření je limitován zejména difusními pochody. Ty ovlivní hlavně tvorbu hořlavé směsi a odvod produktů hoření do okolí. [13]

1.2 Vznik kouře

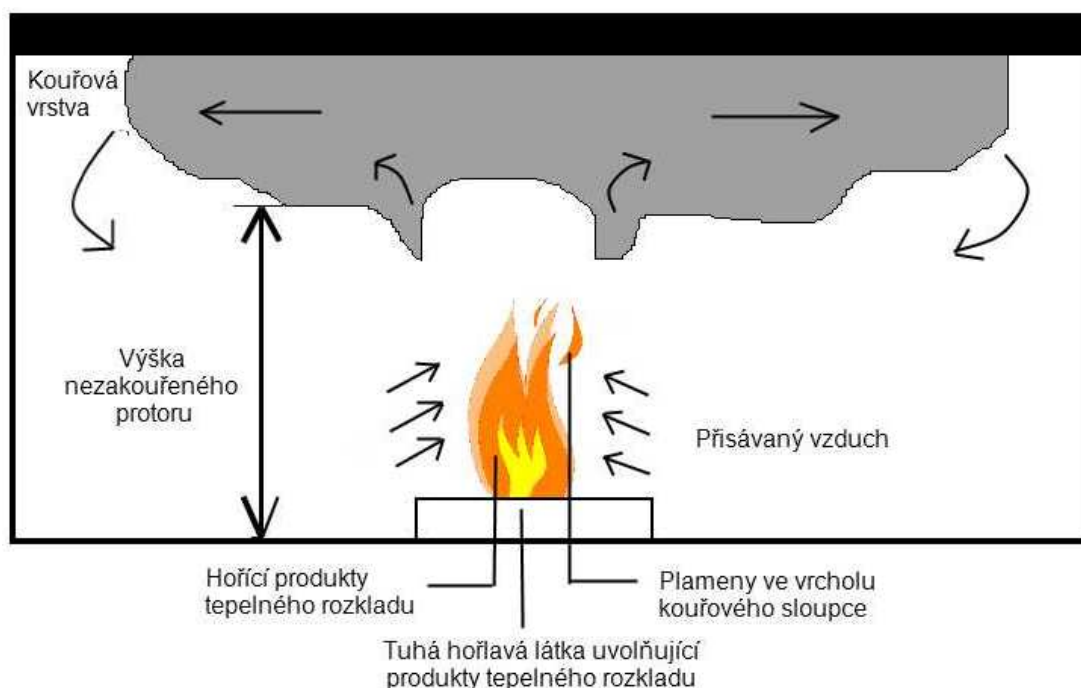
Hoření látek je provázeno světlem a uvolňováním tepelné energie. Teplo působí na okolní hořlavé hmoty a ty vlivem zvyšující se teploty degradují. Plyny se působením tepla zahřívají, u kapalin se zvyšuje intenzita vypařování a u tuhých látek dochází k tepelnému rozkladu. Vznikající plyny a páry se mísí se vzduchem a hoří. Hořením vznikají nové látky – produkty neboli zplodiny hoření a spaliny. Mohou to být plyny, páry, ale i tuhé látky

(např. saze). Výsledkem procesu hoření jsou také nespálené zbytky (např. popel). Drobné částice tuhých hmot se vlivem zvýšené teploty v prostoru a prouděním plynů dostávají do pohybu a následně se mísí se vzduchem. Vše vytváří směs, kterou nazýváme kouř. [13]

Kouř je v literatuře definován různě, např. Kvarčák definuje kouř jako disperzní systém – směs, složenou z velmi malých tuhých a kapalných částic, které jsou v rozptýleném stavu v plynných produktech hoření a vzduchu. [13] Podle Bebčáka, Šenovského a Prokopa je kouř směs plynných zplodin hoření a zplodin termického rozkladu s pevnými částicemi a vzduchem. [3]

Samotná tvorba kouře je závislá na schopnosti látek kouř uvolňovat a na rychlosti vyhořívání. [3] Na *Obrázku 1* je znázorněn vývin kouře při požáru. Nad místem požáru stoupá sloupec plamenů a horkých kouřových plynů, které se budou trvale pohybovat vzhůru, protože jejich hmotnost je nižší než hmotnost vzduchu. Okolní vzduch je přisáván do stoupajícího proudu, směšuje se s ním a dodává kyslík potřebný k hoření plynných produktů vzniklých tepelným rozkladem paliva. [4]

Obrázek 1: Vývin kouře při požáru [4]



1.3 Vlastnosti kouře

Vlastnosti kouře závisí na složení hořících látek a podmínkách hoření. Kouř je charakteristický svou teplotou, hustotou a chemickým složením. Charakteristické pro určité skupiny látek jsou i barva a zápach kouře. [3]

1.3.1 Složení kouře

Složení kouře je závislé na složení hořlavé látky a podmínkách hoření. Kouř u požáru je směs částic uhlíku, dehtu, prachu a hořlavých plynů a par. Při požárech nejčastěji hoří organické látky skládající se z uhlíku, vodíku a kyslíku (např. dřevo, textilie, plastické hmoty papír apod.). Proto se v kouři obvykle nachází dusík, kyslík, oxid uhličitý, oxid uhelnatý, vodní páry, uhlík a neshořelé zbytky v podobě drobných částic o velikosti 10^{-3} až 10^{-7} m. [3]

1.3.2 Optická hustota kouře

Optická hustota kouře označuje množství světla, které je absorbované nebo rozptýlené v kouři. Závisí na množství pevných částic v kouři obsažených. Optickou hustotu kouře také velmi ovlivňuje intenzita výměny plynů v prostoru hoření. S rostoucí intenzitou výměny plynů dochází k tzv. zředování kouře a jeho hustota klesá [3].

Podle hustoty rozlišujeme [5]:

- Hustý kouř – viditelnost do 3 m
- Středně hustý kouř – viditelnost 3 – 6 m
- Řídký kouř – viditelnost 6 – 12 m

1.3.3 Barva a zápach kouře

Podle barvy a zápachu kouře můžeme usuzovat, která látka hoří, i když se barva může měnit v závislosti na podmínkách požáru. [3]

V následující tabulce jsou uvedeny barvy kouře daných skupin látek.

Tabulka 1: Barva kouře [3]

Látka	Barva kouře
Dřevo	Šedočerná
Seno, sláma, papír	Žlutohnědá
Přírodní tkaniny a textilie	Hnědá
Ropné produkty	Černá
Fosfor	Bílá

Při hoření tkanin z přírodních materiálů, srsti, vlasů nebo kůže se vytváří nepříjemně zapáchající látky, které obsahují pyridin (C_5H_5N), chinolin (C_9H_7N) a další dusíkaté a sirné sloučeniny. Při hoření gumy vznikají různé sirné sloučeniny, které způsobují ostrý zápach dýmu. Oleje a tuky produkují kouř obsahující akrolein ($CH_2=CH-CHO$), který je typický velmi ostrým zápachem dráždicím sliznice dýchacích cest a očí. Při požáru ropných produktů jsou v kouři navíc saze a uhlovodíky, které vytvářejí specifický zápach tohoto kouře. [15]

2 RIZIKA SPOJENÁ S KOUŘEM

Riziko spojené s vývojem kouře je velmi vážné. Důsledky způsobené kouřem jsou mnohem závažnější než přímými účinky hoření. Většina obětí požárů umírá v důsledku kouře. [6]

Hlavními riziky spojenými s kouřem jsou snižování obsahu kyslíku v daném prostoru, toxicita zplodin hoření, snížení viditelnosti v zakouřených objektech a následná ztráta orientace, korozivita kouře a hořlavost plynů a par vznikajících při nedokonalém hoření (riziko prostorového vznícení – *flashover*, *backdraft*). Kouřem je také transportováno značné množství tepla, tudíž dochází k rychlejšímu ohřevu okolních materiálů a rozšiřování požáru. [6]

Rizika spojená s kouřem jsou mnohem nebezpečnější, jedná-li se o požár v uzavřeném prostoru, za který bychom mohli tunel považovat.

2.1 Korozivita kouře

Chemická reakce kouře je většinou kyselá. Kyselé plyny (HCl, HBr, HF atd.) jsou rozpustné ve vodě a vytvářejí v kouři mlhu slabých kyselin. Kyseliny se usazují na povrchu konstrukcí a předmětů v místě požáru, pronikají do trhlin, pod kryty elektrických přístrojů, rozvaděčů apod. Největší škody způsobené korozí vznikají na elektrických zařízeních, ale projevují se i na kovových a železobetonových konstrukcích. [6]

2.2 Snižování obsahu kyslíku

Během hoření dochází ke zvyšování koncentrace zplodin hoření, které má za následek snižování kyslíku v prostoru. Při sníženém obsahu kyslíku v ovzduší vzniká nebezpečí ohrožení života lidí nacházejících se v těchto prostorách.

Normální obsah kyslíku v ovzduší je 21%, ale již při 18% lidský organismus nedostatek kyslíku pociťuje. V následující tabulce jsou uvedeny účinky na člověka při snížené koncentraci kyslíku v okolní atmosféře. [23]

Tabulka 2: Účinky snížené koncentrace kyslíku na člověka [23]

Množství O ₂ ve vzduchu (%)	Příznaky
21	Žádné – normální podmínky
17	Zhoršená koordinace svalové činnosti, zrychlené dýchání kvůli kompenzaci sníženého množství O ₂
12	Bolesti hlavy, závratě, rychlá únava (malátnost)
9	Bezvědomí
6	Smrt po několika minutách následkem udušení a selhání srdce
Poznámka: Jednotlivé symptomy se mohou u různých lidí objevovat při vyšších i nižších koncentracích kyslíku v ovzduší. Konkrétní hodnoty závisí na délce pobytu v takovém prostředí. Rovněž se nebere v úvahu přítomnost dalších zplodin hoření.	

2.3 Zplodiny hoření

Vznikající zplodiny hoření mohou mít negativní vliv nejen na zdraví lidí, ale taky na materiály nacházející se v zakouřeném prostoru, čímž vznikají dodatečné ztráty způsobené požárem. [3]

2.3.1 Rozdělení zplodin hoření

Zplodiny můžeme rozdělit podle skupenství na pevné, kapalné a plynné. Pevné zplodiny hoření zůstávají v ohnisku ve formě popela nebo jsou součástí kouře. Kapalné zplodiny se uvolňují jako páry nebo ve formě aerosolu v dýmu nebo kouři spolu se zplodinami. [5]

Dále se dají zplodiny podle dokonalosti hoření rozdělit na zplodiny dokonalého a nedokonalého hoření. [5] Rozdělení je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka 3: Rozdělení zplodin hoření [5]

Pevné	Popel	<i>Dokonalé hoření</i>	Oxidy, uhličitany, fosforečnany, sírany, a jiné soli kovů
		<i>Nedokonalé hoření</i>	Částečně degradovaný materiál
	Kouř	<i>Dokonalé hoření</i>	Oxid fosforečný, částice popela
		<i>Nedokonalé hoření</i>	Saze, nespálené částice hořící látky
Kapalné	Páry, mlhy	<i>Dokonalé hoření</i>	Vodní pára
		<i>Nedokonalé hoření</i>	Uhlovodíky, alkoholy, aldehydy, ketony, karboxylové kyseliny
Plynné	Dým, kouř	<i>Dokonalé hoření</i>	Oxid uhličitý, dusík, oxid siřičitý, halogenovodíky, nitrozní plyny
		<i>Nedokonalé hoření</i>	Oxid uhelnatý, kyanovodík, uhlovodíky

2.3.2 Toxicita zplodin hoření

Mnohé zplodiny hoření jsou toxické, tedy nebezpečné lidskému organismu. Úmrtí při požárech jsou ve většině případů důsledkem otravy než vysokých teplot.

Pod pojmem otrava rozumíme takový děj, kdy určitá látka, po průniku do organismu, mění základní funkci buněk tohoto organismu. Otrava může být buď akutní nebo chronická. [16]

Akutní otrava je takové působení toxické látky, které vyvolá okamžitou reakci organismu. K tomuto typu otravy dochází obvykle při působení větších dávek toxické látky v krátkém časovém úseku (např. pracovní doba). [16]

Chronická otrava je dlouhodobé působení obvykle menších dávek toxické látky. Onemocnění se projeví až po určité, často i delší době. S tímto typem se můžeme setkat například při dlouhodobé práci s nebezpečnými chemikáliemi, ale i při dlouhodobém znečišťování životního prostředí. [16]

V hořlavých materiálech je nejvíce zastoupen uhlík. Při dokonalém hoření je oxidován na oxid uhličitý, při nedokonalém vzniká oxid uhelnatý. Podle složení látek a průběhu hoření mohou vznikat i jiné dominantní toxické zplodiny hoření, jejichž účinky a zdroje jsou uvedeny v následující tabulce [21].

Tabulka 4: Toxické plynné produkty hoření [21]

Toxické produkty	Chemický vzorec	Možné zdroje	Účinky
Chlorovodík	HCl	Materiály obsahující chlor, např. polyvinylchlorid	Korozivní a velmi iritující
Kyanovodík	HCN	Nedokonalé hoření materiálů obsahujících dusík, např. vlna, hedvábí, polyamidy, polyakrylonitrily, polyuretany	Velmi jedovatý, v krátké době letální
Sulfan	H ₂ S	Materiály obsahující síru, např. vlna	Iritující, způsobuje závratě a ztěžuje dýchání
Oxid dusičitý	NO ₂	Nitráty, např. nitrocelulóza použitá při výrobě umělého hedvábí	Působí na dolní cesty dýchací, toxické účinky se projevují s časovým zpožděním
Oxid siřičitý	SO ₂	Dokonalé hoření materiálů obsahujících síru	Irituje oči a dýchací trakt, především horní cesty dýchací
Amoniak	NH ₃	Materiály obsahující dusík, např. vlna, polyamidy, polyuretany	Irituje horní cesty dýchací i plíce

2.3.2.1 Oxid uhelnatý - CO

CO je bezbarvý plyn bez zápachu, je lehčí než vzduch. Oxid uhelnatý vzniká u každého požáru a způsobuje více úmrtí, než ostatní zplodiny hoření. Látky produkují CO zejména při nedokonalém hoření, kdy z místa požáru stoupá hustý tmavý kouř. [23]

Oxid uhelnatý má schopnost vázat se na hemoglobin, který obsahují červené krvinky. Váže se na hemoglobin 200x snadněji než kyslík. Dochází k tvorbě karboxyhemoglobinu (COHb), a tím pádem je znemožněno, aby se na červené krvinky navázal kyslík. Nastává bezvědomí v důsledku nedostatečného zásobování mozku kyslíkem. Po krátké době může dojít k úmrtí. [23]

V následující tabulce jsou uvedeny příznaky u člověka, které nastanou při určité koncentraci CO ve vzduchu:

Tabulka 5: Příznaky otravy CO u člověka [5]

CO [g.m ⁻³]	CO ve vzduchu [obj %]	Příznaky
0,11	0,01	Žádné příznaky otravy po dlouhé době
0,23	0,02	Bolesti hlavy po 2 – 3 hodinách
0,34	0,03	Zřetelná otrava po 2 – 3 hodinách
0,46	0,04	Zřetelná otrava po 1 – 2 hodinách
0,5	0,043	Bezvědomí za 2 – 3 hodiny
0,57	0,05	Halucinace za 30 – 120 minut
1,0	0,087	Bezvědomí za 1,5 hodiny, za 6 hodin smrt
1,14	0,10	Smrt za 2 hodiny
1,72	0,15	Smrt za 1 hodinu
3,44	0,3	Smrt za 30 minut
5,0	0,44	Smrt v několika minutách
9,16	0,79	Okamžitá smrt zadušením

2.3.2.2 Oxid uhličitý - CO₂

CO₂ je bezbarvý nehořlavý plyn bez zápachu, je těžší než vzduch. Oxid uhličitý je konečným produktem hoření látek, které jsou bohaté na uhlík, přičemž ho vzniká více při dokonalém hoření než při žhnutí. [23]

Oxid uhličitý způsobuje zrychlené dýchání člověka, které je doprovázené bolestmi hlavy, závratěmi, pocením a rozrušením (při koncentraci asi 5%). Zrychlené dýchání může rovněž způsobit to, že se do organismu dostává větší množství ostatních zplodin hoření. Mezi 10 až 12% CO₂ ve vzduchu může dojít ke smrti člověka důsledkem ochrnutí dýchacího centra mozku. [23]

2.3.2.3 Chlorovodík - HCl

Chlorovodík se uvolňuje při tepelném rozkladu polvinylchloridu (trubky, desky, tyče ve stavebnictví, dekorační a obkladové materiály, v měkčené formě v obalové technice – igelit, čalounictví, obuvnický a kožedělný průmysl – pláštěnky, podlahoviny, dopravní pásy, gramofonové desky, izolace elektrických kabelů). [5]

Je to bezbarvý plyn těžší než vzduch, silně dráždí plyn dýchací cesty a oči. Po styku s vodou dochází k rozpouštění chlorovodíku za vzniku kyseliny chlorovodíkové. Má tedy velmi silné korozivní účinky a způsobuje tedy i značné škody následné [5].

Chlorovodík vyvolává otok horních cest dýchacích, který může způsobit zástavu dýchání a smrt udušením. [23]

2.3.2.4 Nitrozní plyny - NO_x

Nitrozní plyny NO_x jsou směsí oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO₂). Uvolňují se při hoření nitrolátek (celuloid, nitrocelulóza, nitrolaky), při tepelném rozkladu kyseliny dusičné a dusičnanů (umělá hnojiva), při trhacích pracích (v odstřelových plynech jsou obsaženy v 15 až 20 %), v malém množství se vyskytují ve spalínách všech druhů paliv. [5]

Jsou žlutohnědé nebo červenohnědé barvy a štiplavého zápachu, těžší než vzduch. [5]

Dráždí organismus, zejména dýchací cesty. Způsobují dráždivý kašel, edém plic s následnou smrtí udušením. Nebezpečná je doba latence, otrava se neprojeví bezprostředně po nadýchání. [23]

Všechny oxidy dusíku se rozpouštějí ve vodě za vzniku dusíkatých kyselin, které reagují v lidském těle s alkalickými sloučeninami za vzniku nitrátů a nitridů. Nitráty a nitridy napadají krevní částice, což vede ke kolapsu a celkovému komatu. Hlavními příznaky je rozšíření cév, kolísání krevního tlaku bolest hlavy a mdloby. [23]

2.3.2.5 Kyanovodík – HCN

Kyanovodík vzniká při hoření polyamidů (Silon, Nylon, Nomex, vlákna, kordové tkaniny, strojní součástky), polyuretanů (Molitan, tepelná izolace, stavebnictví, nábytkářství, kožedělný průmysl, automobilový průmysl), polyakrylonitrilových vláken, ABS (akrylonitril/butadien/styren – Forsan, elektrotechnický, spotřební a automobilový průmysl), močovinoformaldehydové pryskyřice (Umakart, tepelná a zvuková izolace, chladicí technika, stavebnictví, lepidla, tmely, pojiva, nátěrové hmoty). [5]

Kyanovodík je bezbarvý plyn s hořkomandlovým zápachem, lehčí než vzduch. Na lidský organismus působí na úrovni buněk a tkání, způsobuje blokádu dýchacích enzymů a tkáňové dušení. Vstřebává se plícemi i neporušenou kůží. [5] Rychlost vstřebávání je závislá na teplotě a vlhkosti kůže. Vstřebávání je rychlejší, čím je kůže teplejší a vlhčí. Organismus reaguje na přítomnost HCN zvýšením tepové frekvence až na 100 tepů za minutu.

Koncentrace 135 ppm vyvolává smrt postiženého do 30 minut, při koncentraci 270 ppm nastává smrt okamžitě. [23]

Kyanovodík je po oxidu uhelnatém druhou nejnebezpečnější zplodinou hoření. V kombinaci s ním již v malém množství způsobuje, že koncentrace pouhých 20% COHb v krvi je smrtelná. [5]

2.3.2.6 Fosgen – COCl₂

Vzniká při hoření chladících kapalin obsahujících freon. Je to bezbarvý plyn bez chuti, zápach připomíná shnilé seno. Zápach je znatelný již při jeho koncentraci 6 ppm. Snadno reaguje s vodou, přičemž vzniká i kyselina chlorovodíková. [23]

Má silné dráždivé účinky. Jeho jedovatost se projeví až několik hodin poté, co je organismus vystaven jeho působení. Smrtelná koncentrace je 25 ppm. [23]

2.3.2.7 Oxid siřičitý SO₂

Vzniká při hoření síry a sirných sloučenin. Je to bezbarvý plyn štiplavého zápachu. V dnešní době zaujímá co do množství vedoucí místo mezi škodlivinami, které se dostávají do životního prostředí z průmyslové výroby. Je to důsledek obsahu síry v uhlí a ropě a nedostatečného zachycování SO₂ z kouře při jejich spalování. [15]

Oxid siřičitý způsobuje u člověka podráždění vlhkých sliznic, zejména v horních cestách dýchacích. Velká akutní expozice může vést ke křeči hlasivek nebo reflexní zástavě dechu a následné smrti. Menší expozice způsobuje bronchitidu a zánět spojivek. Jeho celkové působení na lidský organismus ovlivňuje metabolismus bílkovin a cukrů a způsobuje nedostatek vitamínu B a C. Může se projevit únavou, nápadnou žízní, žaludečními katary a zácpou. [15]

2.3.2.8 Amoniak NH₃

Amoniak je bezbarvý plyn, dusivého zápachu a žíravé chuti. Je hořlavý, výbušný a jedovatý. Díky svému ostrému čpavému zápachu je postřehnutelný již při koncentraci 5 ppm (1 ppm = 0,695 mg.m⁻³). [16]

Díky dobré rozpustnosti amoniaku ve vodě dráždí hlavně sliznice očí a horních cest dýchacích. Dráždí také centrální nervovou soustavu, vyvolává křeče a poškozuje ledviny. Vysoké koncentrace způsobují zástavu dechu a edém plic. [16]

Tabulka 6: Následky působení amoniaku pro člověka [16]

Koncentrace [ppm]	Následky
20 -100	Přijatelná i pro delší pobyt
300 – 500	Vzhledem k rychlému návyku lze vydržet po dobu 1 hodiny
2500	Životu nebezpečná po půlhodinové inhalaci
5000	Rychle usmrcuje

2.3.2.9 Ultrajedy

Ultrajedy jsou chemické sloučeniny, které již v mikrogramovém množství mohou vyvolat velmi vážné změny v organismu vedoucí k závažným až nevyléčitelným nemocem. V miligramových množstvích způsobují okamžitou smrt. [23]

Ohrožené osoby i zasahující hasiči jim jsou vystaveni jak během požáru, tak i po něm, protože ultrajedy absorbují na saze unikající v kouři a po ochlazení se usazují v místě a okolí požářiště. [5]

Jedná se například o chlorované ultrajedy (PCDBF - polychlordibenzfuran, TCDBO - polychlordibenzparadioxin) vznikající při shoření většího množství PVC, nebo benzo/a/pyren (BaP), který má karcinogenní účinky. Je obsažen v uhlíkatých zbytcích některých polymerů. [5]

2.3.3 Hořlavost zplodin hoření

U zplodin hoření není nebezpečná jen jejich toxicita, ale i hořlavost. Zplodiny hoření se mohou vznítit nebo explodovat. Toto nebezpečí hrozí především při požárech v uzavřených prostorech. Mezi hlavní nebezpečí v různých fázích požáru patří *rollover* (žíhavé plameny), *flashover* (náhlé vzplanutí plynů v celém prostoru) a nejvíce nebezpečný *backdraft* (explozivní hoření). Všechny tři jevy se od sebe liší silou svého účinku a fází požáru, ve které vznikají. [23]

2.3.3.1 Rollover

V počáteční fázi požáru je obvykle k dispozici dostatečné množství kyslíku ve vzduchu. Při hoření dochází k vývinu zejména vodní páry a oxidu uhličitého, v menším množství vznikají oxid uhelnatý a oxid siřičitý. V místnosti zasažené požárem mírně vzrůstá teplota, teplota plamene je přibližně 500 °C. [23]

Rollover, někdy nazývaný *flameover*, vzniká tehdy, shromáždí-li se větší množství hořlavých plynů v počáteční fázi požáru u stropu hořící místnosti. Tyto velmi zahřáté hořlavé plyny jsou vytlačovány zplodinami hoření z hořící místnosti do okolí, kde se mísí se

vzdušným kyslíkem. Jestliže koncentrace hořlavých plynů dosáhne meze hořlavosti, dojde k jejich vznícení a rychlému rozšíření požáru. [23]

Plameny se šíří velkou rychlostí v úrovni stropu na velké vzdálenosti do té doby, dokud nevyhoří všechny vzniklé hořlavé plyny. Zasahující hasiči se proto musí pohybovat při zemi a soustředit se na co nejrychlejší uhašení ohniska požáru, protože k jevu *rollover* dochází pouze při intenzivním vývinu hořlavých plynů a par. [23]

2.3.3.2 Flashover

Flashover se nazývá situace, při které dojde k náhlému vzplanutí všech hořlavých materiálů v celém prostoru hořící místnosti najednou. Hlavní příčinou jevu je zahřátí všech ostatních hořlavých hmot v místnosti na takovou teplotu, při níž uvolňují ze svého objemu hořlavé plyny a páry. V momentě, kdy se koncentrace těchto plynů a par dostane nad spodní mez výbušnosti dojde k jejich okamžitému vznícení. [23]

Na základě experimentů bylo zjištěno, že *flashover* vzniká při teplotě v prostoru 500 až 600 °C a hustotě tepelného toku 20 000 W.m⁻². [13]

Hlavní nebezpečí *flashoveru* pro zasahující hasiče je ten, že ruší zásadu při zemi je menší teplo. [23]

2.3.3.3 Backdraft

Ke vzniku *backdraftu* dochází po fázi volného rozvoje požáru, kdy v uzavřené místnosti dojde k takovému poklesu koncentrace kyslíku ve vzduchu, že není možné další plamenné hoření. Teplota a tlak v místnosti rychle roste. Dochází k uvolňování výbušných plynů z předmětů v místnosti. Tyto výbušné plyny spolu se zplodinami hoření zvyšují riziko vzniku *backdraftu*, ke kterému dochází tehdy, dostane-li se do místnosti čerstvý vzduch s normální koncentrací kyslíku (otevření dveří, rozbití oken). Čerstvý vzduch naředí směs horkých plynů pod horní mez výbušnosti a dochází k výbuchu této směsi v místnosti. [23]

2.4 Ztráta orientace

Ztráta orientace je vyvolána špatnou nebo nulovou viditelností, která je způsobena silným vývinem kouře.

Možnost vidění je dána jistou minimální intenzitou světla dopadajícího na sítnici oka, tedy jistým počtem fotonů za sekundu. V zakouřeném prostoru se fotony do oka dostávají mnohem obtížněji než v nezakouřeném prostředí. Část fotonů je absorbována tuhými částicemi, část je odražena kapalnými částicemi. Nedopadnou tedy do oka, i když měly před interakcí s kouřem správný směr. Nedostatečný tok fotonů na sítnici oka má fyziologický důsledek podobný slepotě. [6]

Ztráta orientace má negativní vliv hlavně na provedení průzkumu místa požáru, záchranu a evakuaci ohrožených osob a znesnadňuje provedení hasebního zásahu, postup a ústup hasičů. Obecně vzato zhoršuje účinnost zásahu.

Silné zakouření a následná ztráta orientace způsobuje rovněž paniku ohrožených osob.

3 SPECIFICKÉ PODMÍNKY V TUNELECH

Tunel je liniová podzemní stavba, kterou vede pozemní komunikace (silnice, dálnice, místní komunikace) nebo železnice, lanovka apod., umožňující plynulou a bezpečnou jízdu podcházením horských masivů, vodních překážek, osídlených oblastí, kulturně, ekonomicky cenných území apod. [14]

Podle využití můžeme rozdělit tunely na tři typy:

- tunely na pozemních komunikacích
- železničních komunikacích
- metro

Každý typ má své specifické charakteristiky, liší se technologickým vybavením a i příčiny požáru mohou být rozdílné.

Velký důraz je kladen zejména na bezpečnost silničních tunelů. Riziko je zde mnohem větší než na otevřených komunikacích, protože nejsou ohroženi jen účastníci dopravní nehody, ale požár v tunelu může působením kouře ohrozit životy všech ostatních osob, které se v tunelu nacházejí.

3.1 Charakteristika silničních tunelů

Hlavní částí tunelu je tunelová trouba, což je část tunelu vymezená tunelovými portály, kterou je vedena pozemní komunikace. Tunelový portál je část tunelu, která ohraničuje tunelovou troubu z vnější části a utváří vjezdový či výjezdový (popř. kombinovaný) otvor. V případě jednosměrných tunelů, kde má každý jízdní směr svou tunelovou troubu, je jeho součástí tunelová propojka, která slouží jako částečně chráněná úniková cesta, jenž obě trouby spojuje ve vymezených vzdálenostech. Může plnit funkci záchranné cesty a bývá přetlakově větráná. [14]

Silniční tunely dělíme podle [14]:

- Délky:
 - Krátké (do 300 m)
 - Střední (do 1000 m)
 - Dlouhé (nad 1000 m)
- Příčného uspořádání:
 - Obousměrné – doprava probíhá v obou směrech v jedné tunelové troubě, především u silničních tunelů

- Jednosměrné – každý směr má svou tunelovou troubu, především u dálničních tunelů

3.2 Větrání tunelu

Větrání tunelu je velmi důležitou součástí projektové dokumentace. Větrání musí zajistit následující funkce [18]:

- Zabezpečení koncentrace škodlivin ve vzduchu v mezích nejvyšších přípustných koncentracích nejnebezpečnějších látek, se zřetelem na dobu pohybu osob v tunelu a ve smyslu hygienických předpisů
- Zajištění dobré viditelnosti pro průjezd vozidel při znečištění tunelového vzduchu emisemi výfuků vznětových motorů s ohledem na povolenou rychlost vozidel
- Snížení účinku kouře a tepla při požáru na osoby nacházející se v tunelu včetně složek integrovaného záchranného systému
- Řízení rozptylu škodlivých látek ve vzduchu způsobených exhalacemi vozidel do okolí tunelu, a tím snížení imisního zatížení okolí

Větrací systémy tunelů můžeme rozdělit na přirozené a nucené. Nucené větrání dělíme na podélné, příčné, a polopříčné.

Přirozené větrání nevyžaduje žádné přídavné technické zařízení. Vzduch se obměňuje díky rozdílu tlaku a teploty mezi portály a prostřednictvím vozidel způsobujících výměnu vzduchu, tzv. pístovým efektem. Velký vliv na přirozené větrání má i směr převládajících větrů a celkový odpor tunelu pro přicházející vzduch. [11]

Podélné větrání je nejjednodušší systém nuceného větrání, protože vyžaduje minimální stavební úpravy. Provádí se podélnými proudovými ventilátory, upevněnými v podhledu klenby tunelového ostění, vzduchovými dýzami, které vhání vzduch podélným směrem do tunelové trouby a dýzami umístěnými za portálem, větracími šachtami s ventilátory, které vyvolávají podélné větrání v tunelu. Rychlost proudění vzduchu v tunelu nesmí překročit 8 m.s^{-1} u jednosměrném provozu a 10 m.s^{-1} u obousměrného provozu. [11]

U **polopříčného větrání** se přídavný vzduch přivádí odděleným kanálem, který je vedený souběžně s délkou tunelu, a v pravidelných vzdálenostech se vyfukuje otvory do dopravního prostoru. Vzduchový kanál je většinou řešený tak, že je od dopravního prostoru oddělen mezistropem. Vyfukovaný vzduch je odváděn ven portály tunelu. Rozdělení odcházejícího vzduchu na oba portály se řídí výsledným pístovým působením vozidel a

rozdílem teplot a tlaku vzduchu. Tento systém může být případně obrácený, tak že se znečištěný vzduch odsává a vede v odděleném vzduchovém kanálu a čistý vzduch se nasává portály tunelu. Tento systém má malou účinnost. [11]

Při **příčném větrání** je přiváděný vzduch veden odděleným kanálem (vedený klenbovou částí nebo pod vozovkou) a je vyfukován průduchy v ostění s nastavitelnými otvory – regulačními klapkami, umístěnými přibližně v úrovni výfuků vozidel. Kontaminovaný vzduch se z dopravního prostoru odvádí sběrným vzduchovým kanálem. [11]

Ventilace v tunelu má zásadní vliv na rozvoj a šíření požáru, kouře a zplodin hoření. Systém požárního větrání se navrhuje podle délky tunelu, dopravního zatížení, stavebního řešení a jiných faktorů. Větrání tunelu v případě požáru musí zabezpečit [11]:

- Únik osob z prostoru tunelu nebo do chráněných nezadýmených prostorů (druhá tunelová trouba, úniková chodba apod.)
- Ochranu stavební konstrukce tunelu před tepelným poškozením
- Ochranu technologického vybavení

3.3 Požár v tunelu

U požáru v tunelu můžeme předpokládat rychlé šíření zplodin hoření, požáru a vysokou teplotu, která v extrémních případech dosahuje i přes 1000 °C. Zplodiny hoření jsou velmi toxické vzhledem k výskytu a charakteru hořlavých látek v místě požáru (provozní nádrže vozidel, vozidla a jejich náklad). Jejich množství a hustota kouře jsou faktory, které zásadně ovlivňují zásah a záchranu osob. [11]

V tunelu hrozí nebezpečí výbuchu z důvodu možného výskytu vozidel na plynový pohon nebo vozidel převážejících nebezpečné látky a předměty.

Působením tepla na stavební konstrukce dochází k odprýskávání betonu, odpadávání konstrukcí a k jejich značnému tepelnému namáhání (způsobuje ztrátu únosnosti výztuže), současně může dojít k poruchám větrání. [11]

V případě požáru v tunelu je třeba chránit osoby unikající tunelem (technickými nebo stavebně-technickými opatřeními před účinkem ohně, dýmu, vysoké teploty a toxickými zplodinami), stavební konstrukci před vážným poškozením a technologické zařízení tunelu. [11]

3.3.1 Silniční tunely

Více než 95% všech požárů v tunelech je způsobeno elektrickými a mechanickými poruchami vozidel, jako jsou například elektrotechnické závady nebo přehřátí brzd či motoru.

Méně časté příčiny jsou nehody, technické závady na vybavení tunelu a údržbářské práce v tunelu. I když nehody nejsou častou příčinou požárů, většinu velkých požárů nehody způsobily. [22]

V následující tabulce je uveden přehled velkých požárů v silničních tunelech.

tabulka 7: Největší požáry v silničních tunelech [22]

Název tunelu	Stát	Rok	Příčina	Trvání
<i>Nihonzaka</i>	Japonsko	1979	nehoda	4 dny
<i>Mont Blanc</i>	Francie/Itálie	1999	samovznícení nákladního automobilu	53 hodin
<i>Tauernský tunel</i>	Rakousko	1999	nehoda	15 hodin
<i>Gotthard</i>	Švýcarsko	2001	nehoda	20 hodin

3.3.2 Železniční tunely

Železniční tunely mohou být buď obousměrné (tunelem vedou dvě kolejové trati) nebo jednosměrné (vede jím pouze jedna trať). V prvním případě tedy může dojít k výskytu dvou vlakových souprav v tunelu zcela běžně. V případě jednosměrného tunelu se vyskytnou v tunelu dvě vlakové soupravy najednou pouze v případě dlouhých tunelů. [22]

V železničních tunelech je oproti silničním tunelům všeobecně více instalovaných elektrických a mechanických zařízení, které přispívají k požárnímu riziku. Pravděpodobnost vzniku požáru je závislá na spotřebě energie, projektované úrovni a údržbě instalací. Instalace mohou být umístěny přímo v tunelu nebo v separovaných místnostech, například v příčných pasážích nebo v servisních galeriích. [22]

Pokud dojde k požáru vlakové soupravy v tunelu, je co do následku požáru důležité rozlišit jedná-li se o požár osobního vlaku nebo nákladního vlaku. Osobní vlaky nepřevážují kromě zavazadel a pošty žádný náklad, ale na druhou stranu je ohroženo velké množství osob. Příčinou požáru může být neopatrnost pasažérů, žhářství, vykolejení nebo srážka vlaku, mechanická závada na vagónech (např. brzdy) nebo závada elektrických zařízení, zejména vytápěcích systémů. [22]

U nákladních vlaků je počet osob minimální (strojvůdce a maximálně 1-2 dělníci), ale vlak převáží různé typy nákladu zahrnující i nebezpečné látky. Příčinou požáru může být srážka nebo vykolejení vlaku, elektrické závady ve vagónech, mechanické závady vagónů nebo vznícení či samovznícení nákladu. [22]

V následující tabulce je uvedený přehled závažných požárů v železničních tunelech.

tabulka 8: Příklady velkých požárů v železničních tunelech [22]

Tunel	Stát	Rok	Příčina	Následek
<i>Summit tunnel</i>	Velká Británie	1984	vykolejení nákladního vlaku	Vyhořelo 13 cisteren s benzínem
<i>Channel tunnel</i>	Velká Británie/Francie	1996	žhářství	Rozsáhlé škody na zařízení tunelu
<i>Kaprun</i>	Rakousko	2000	Závada topného tělesa, netěsnost hadice hydraulického oleje	155 mrtvých

3.3.3 Metro

Co se týče příčin požáru je metro v mnoha ohledech podobné k osobnímu vlaku. Významný rozdíl tunelů metra od tunelů na železnici je v krátké vzdálenosti jednotlivých zastávek, skutečnost, že většina stanic je podzemních a mnoho z nich je spojeno s obchodními centry nebo jinými budovami. Pro tunely metra jsou závažné i požáry, které vzniknou ve stanicích nebo přilehlých prostorách a šíří se do prostorů metra. Další charakteristikou pro metro je velký počet lidí, které mohou být požárem ohroženy. [22]

V následující tabulce jsou uvedeny velké požáry metra.

tabulka 9: Velké požáry v metrech [22]

Metro	Stát	Rok	Příčina	Počet obětí
<i>King Cross Station</i>	Velká Británie	1987	požár eskalátoru	31
<i>Baku Metro</i>	Ázerbajdžán	1995	elektrická závada	300
<i>Daegu Subway</i>	Korea	2003	žhářství	194

4 ŠÍŘENÍ KOUŘE V TUNELU

Při požárech se teplý dým, jako hrubá vrstva, rozšiřuje rychlostí až několika metrů za sekundu podél tunelového stropu na jednu nebo na obě strany od místa požáru v závislosti na směru a síle proudění vzduchu. Během prvních 5 - 10 minut po vypuknutí požáru se může nad jízdním pruhem udržovat až dvoumetrová čistá vzduchová vrstva. Potom se ve větších vzdálenostech od místa požáru vzdálenost dýmové vrstvy od vozovky snižuje z důvodu chladnutí dýmu a smíšení se vzduchem, který proudí k místu požáru. [11]

Nebezpečný jev, který může při požáru v tunelu nastat je tzv. *back layering*, neboli zpětný tok požárních plynů, ke kterému dochází, pokud je rychlost proudění vzdušiny v tunelu menší než je kritická rychlost pro daný výkon požáru a průřez tunelu. [10]

4.1 Stratifikace kouře v tunelu

Stratifikace¹ kouře je důležitá pro ty, kteří musí z tunelu uniknout. Šíření kouře v tunelu je závislé hlavně na rychlosti proudění vzduchu v tunelu. Podle rychlosti můžeme proudění rozdělit do tří skupin [2]:

- nízká nebo přirozená rychlost proudění (0 – 1 m/s)
- průměrná rychlost proudění (1 – 3 m/s)
- vysoká rychlost proudění (> 3 m/s)

Nízká rychlost proudění

Do této skupiny patří tunely s přirozenou ventilací. Kouř se vrství obvykle vysoko v okolí požáru. Vzdálenost zpětného toku požárních plynů (*back layering*) je relativně velká a v některých případech se kouř šíří rovnoměrně na oba směry. Když rychlost šíření kouře dosáhne přibližně hodnoty 1 m/s, dojde k *back layeringu* a kouř se začne šířit proti zdroji požáru. Vzdálenost, kterou kouř urazí než dojde ke zpětnému toku může být až 17x větší než výška tunelu [2]. Tato vzdálenost L_b se dá vypočítat z **Rovnice 1**. Rovnice neplatí pro rychlost proudění menší než 0,5 m/s a větší než 3 m/s.

Rovnice 1: Výpočet L_b [2]

$$\frac{L_b}{H} = \alpha \left(\frac{gQ}{\rho_0 c_p T_0 u^3 H} \right)^{1/3}$$

kde H ... výška tunelu [m]

¹ **Stratifikace** – rozvrstvení, slovo pochází z latinského slova *stratum* – vrstva a *facere* - činit

Q ... tepelný výkon [kW]

ρ_0 ... hustota okolního vzduchu [kg/m^3]

T_0 ... teplota okolního prostředí [K]

u ... rychlost proudění vzduchu [m/s]

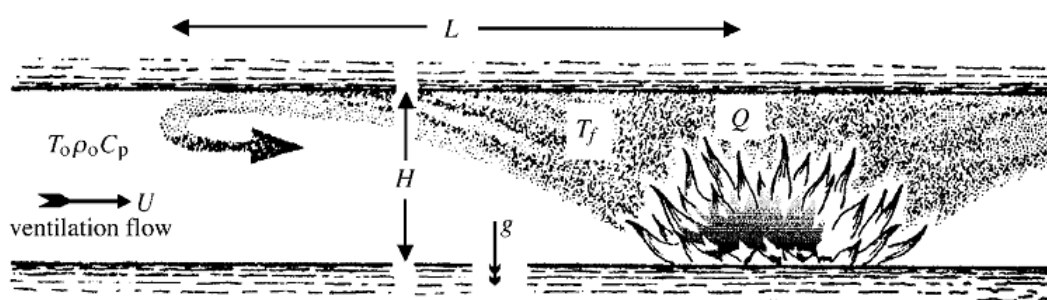
g ... gravitační zrychlení [m/s^2]

c_p ... specifické teplo vzduchu za konstantního tlaku [kJ/kg K]

α ... konstanta úměrnosti, průměrná hodnota = 1,4 [2]

Na **Obrázku 2** je znázorněn *back layering*.

Obrázek 2: Back layering [7]



Průměrná rychlost proudění

Stratifikace kouře v blízkosti ohniska požáru je silně ovlivněna rychlostí proudění vzduchu, zvláště při vyšších rychlostech proudění. Do této skupiny patří tunely s přirozenou ventilací nebo nucenou ventilací. Vzdálenost v jaké dojde k *back layeringu* se pohybuje od 0 do 17-ti násobku výšky tunelu. [2]

Vysoká rychlost proudění

Do této skupiny patří tunely s nucenou ventilací. Stratifikace kouře je obvykle nízká a většinou nedochází k *back layeringu*. Rychlost proudění, která zajišťuje, aby ke zpětnému toku požárních plynů nedošlo, je nazývána kritická rychlost proudění.

4.2 Množství vyvíjeného kouře

Množství vyvíjeného kouře (průtokové množství spalin) má zásadní vliv na dimenzování větrání pro případ požáru. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty

průtokového množství kouře pro požár daného počtu a druhu vozidel. Údaje o množství kouře jsou v mnoha zemích vztahovány k údajům PIARC² 1987. [19]

Tabulka 10: Průtokové množství kouře, naměřené hodnoty a příklady doporučených hodnot podle národních standardů [19]

Druhy vozidel	Průtokové množství kouře ³ (m ³ /s)				
	Doporučení institucí				
	PIARC Brusel 1987	RABT (D) 1994	CETU (F) Návrh ⁴ 1996/1997	NFPA 502 (USA) 1998	EUREKA výzkum reálných požárů
1 OV	20	20-40 ⁵	20	20	
1 osobní dodávkový vůz			30		30
2-3 OV			30		
1 dodávkový vůz (menší NV)			50		
Autobus	60	60-90	80	60	50-60
Městský autobus			50-80		
Těžký NV			50-80		240 ⁶
Smíšený náklad (dřevo, pneu, plastický materiál)					50
Cisterna s benzínem	100-200	150-300	300	100-120	

² **PIARC** – světová silniční asociace založená v roce 1909 se sídlem v Paříži. Jejím hlavním cílem je výměna nejnovějších poznatků v oblasti silniční dopravy a silničního hospodářství. Věnuje se výzkumu a odborným pracím a jejich praktickému uplatnění.

³ V případě (polo)příčného větrání míšení vzduchu s oblakem kouře vede na jeho cestě k odsávacím bodům ke zvětšování průtokového množství kouře

⁴ Teplota kouře 300 °C

⁵ 1 – 2 osobní vozidla

⁶ Z analýzy provedené pro systém polopříčného větrání pro požár s vyzářeným výkonem 100 MW

5 KONKRÉTNÍ PŘÍPADY POŽÁRŮ V TUNELECH

Poznatky z požárů v tunelech, ke kterým došlo v minulosti jsou důležité proto, aby se neopakovaly stejné chyby, ke kterým u nich došlo a zvýšila se tak bezpečnost tunelových staveb.

5.1 *Channel Tunnel (1996)*

Channel tunnel nebo taky *Eurotunnel* je díky své konstrukci a jedinečnosti nejznámějším podmořským tunelem na světě. Konstrukce tunelu sestává ze tří paralelních 50 km dlouhých tunelů vyhloubených v průměrné hloubce 40 m pod mořským dnem. Vnější tunely jsou od sebe vzdáleny 30 m a vede jimi jednokolejná trať. Mezi nimi leží střední tunel, který slouží k servisním účelům. [19]

K požáru vlaku jedoucího z Francie do Velké Británie došlo 18. listopadu 1996 v jižním tunelu. Jednalo se o kyvadlový vlak převážející těžká nákladní auta a kamióny. Ve vlaku bylo 31 cestujících a 2 členové posádky v osobním vagóně a strojvůdce v přední lokomotivě. Požár vznikl pravděpodobně požárem jednoho z kamiónů. [19]

Přibližně po dobu dvaceti minut byli cestující a posádka vystaveni účinkům kouře a toxických zplodin, pronikajících do osobního vagónu a kabiny strojvedoucího. Sedm pasažérů muselo postoupit kyslíkovou terapii přímo na místě. [19]

Požár byl relativně dobře ventilován, teploty u stropu tunelu dosahovaly asi 1000 °C a tepelná energie až 500 MW. 10 nákladních vozů bylo extrémně poškozeno, dalších 5 bylo poškozeno méně. Došlo k velkým škodám na vlakové soupravě a lokomotivě a byly poškozeny přes 2 km délky tunelu. [19]

5.2 *Mont Blanc Tunnel (1999)*

Mont Blanc Tunnel je obousměrný tunel vedoucí z Francie do Itálie. Tunel byl otevřen v roce 1965, jeho celková délka je 11,6 km. Šířka tunelu je 8,6 metrů (vozovka 7 m – dva 3,5 m protisměrné jízdní pruhy). Každých 500 metrů je v tunelu odstavný výklenek, jejich celkový počet je 36. Francouzský portál je v nadmořské výšce 1274 m, italský v 1381 m. [19]

Tunel byl odvětráván odděleným odvětrávacím koridorem pod vozovkou pomocí ventilačních šachet, umístěných vedle únikových chodníků na spodní straně tunelu, s ohledem na běžné umístění výfukových potrubí u vozidel. Tento systém se osvědčil jako vhodný pro odvětrávání výfukových plynů, ale při rozsáhlém požáru způsobuje stahování kouře k podlaze

tunelu, čímž se zvyšuje možnost otravy uživatelů tunelu zplodinami hoření a ztěžuje viditelnost a orientace v tunelu. [19]

K požáru došlo 24. března 1999, hustota dopravy byla v ten čas popsána jako průměrná, 90 – 120 vozů/hod. [2]

V 10.53 zajel do odstavného pruhu 6300 metrů vzdáleného od francouzského portálu nákladní automobil převážející margarín a mouku. Když řidič vystoupil, začal nákladní automobil hořet. [2] Po signalizaci požáru nastavil dispečer na italské straně tunelu výkon ventilace na maximum přívodem čerstvého vzduchu na vstup č. 5 pro odvod spalin, což bylo proti bezpečnostním předpisům. [19] V důsledku toho byly veškeré spaliny z hořícího kamionu hnány na francouzskou stranu.

Vlastní příčina požáru belgického kamionu nebyla soudně ani expertizně dodnes prokázána. Následné vyšetření zbytků kamionu po požáru nepřineslo žádné průkazné výsledky vzhledem k jeho totální devastaci požárem. [19]

Při požáru zemřelo celkem 39 lidí, většinou na příjezdové straně z Francie. Požár se podařilo zlikvidovat až za dva dny, 26. března, po 16. hodině. Bylo zničeno 24 nákladních automobilů a ostění v délce 900 m. [19]

5.3 Tauernský tunel (1999)

Tauern Tunnel je jednou z hlavních dopravních tepen vedoucích přes Alpy, která spojuje jižní a severní Evropu. Tunel je obousměrný, dlouhý 6400 m. Větrací systém tvoří podélná ventilace rozdělena do čtyř sekcí. Výfuk znečištěného vzduchu se uskutečňuje odváděcími vzduchovými otvory umístěnými každých 6 metrů ve stropě tunelu, které jsou schopné odvádět znečištěný vzduch kanálem nad stropem tunelu. [19]

K nehodě došlo 29. května 1999, hustota byla v ten den velmi vysoká (800 až 1000 vozů/hod). Nehoda byla způsobena nákladním vozem převážejícím kosmetické výrobky, který vjel zezadu na řadu vozů stojících na červenou. Za tímto nákladním vozem zastavili další čtyři osobní automobily, do kterých nejspíše vlivem mikrosnánku narazil v plné rychlosti další nákladní automobil. Vlivem úniku paliva z proražených nádrží vznikl požár, který zachvátil i kamion s nebezpečným nákladem kosmetických výrobků. Nejdříve začaly vybuchovat jednotlivé spreje a potom došlo k několika velkým explozím s následným rozsáhlým požárem s velkou produkcí kouře. [19]

Díky vhodné manipulaci s větracím systémem a odsávání kouře ke stropu stropními odsávacími otvory nedošlo k rozsáhlejší katastrofě s velkým počtem usmrcených osob vlivem

udušení kouřem, jak tomu bylo u požáru v tunelu Mont Blanc. Rovněž viditelnost v dolních partiích tunelu byla dostatečná pro hasební zásah. [19]

V důsledku požáru shořelo v tunelu celkem 24 osobních a 16 nákladních automobilů. Mezi nimi byl i kamion pro přepravu dobytka, naložený 50 jalovicemi, které se nepodařilo zachránit a při požáru uhořely. [19]

5.4 Kaprun (2000)

Dalším důležitým faktorem pro posouzení tunelu z hlediska nebezpečí požáru je úhel sklonu tunelu. V případě požáru v tunelu lanovky *Gletscherbahn* pod *Kitzsteinhornem* došlo ke komínovému efektu a kouř i požár se šířily směrem k horní stanici. Šanci na přežití měli pouze ti pasažéři, kteří si zvolili únik tunelem směrem dolů. Ostatní zemřeli v důsledku udušení a otravou zplodinami hoření.

Lanovka na *Kitzsteinhorn* byla první alpskou podzemní železnicí. Trať začínala v nadmořské výšce 900 m a končila v *Alpicentru* v nadmořské výšce 2452 m. Vlak tedy musel překonat převýšení kolem 1500 m. Tunel má délku 3,2 km. [2]

11. listopadu 2000, přibližně v 9 hodin, vznikl ve vlaku jedoucím nahoru požár. [2] Příčina požáru se uvádí jako závada na teplovzdušném ventilátoru a netěsnost tlakové hadice vysoce hořlavého hydraulického oleje. K požáru došlo v kabině řidiče, která je přístupná pouze z nástupiště.

V důsledku požáru se vlak v tunelu zastavil (cca 600 m od spodního portálu tunelu) a lidé se snažili uniknout od plamenů pryč. Většina z nich utíkala nahoru a jen dvanáct lidí uposlechno rad dobrovolného hasiče, který byl shodou okolností ve vlaku přítomen, a zachránilo se únikem dolů. Zplodiny hoření otrávily nejen pasažéry hořícího vlaku, ale i řidiče a jednoho cestující ve vlaku protějším a tři zaměstnance [2] v horní stanici, kteří nestačili před rychle se šířícími zplodinami uniknout.

Následky požáru byly katastrofální a obětmi nehody se stalo celkem 155 osob. Podzemní železnice nebyla od katastrofy znovu otevřena a nahradily ji dvě nové kabinkové lanovky.

6 MOŽNOSTI SLEDOVÁNÍ ŠÍŘENÍ KOUŘE V TUNELU

Závažné požáry v tunelech v minulosti (*Mont Blanc Tunnel, Tauern Tunnel...*) vyvolaly diskusi široké veřejnosti o bezpečnosti těchto staveb. Závažnost požárů spočívala hlavně ve velmi tragických následcích co do počtu usmrcených a zraněných osob a materiálních škod. [10]

V uplynulých desetiletích byla v tunelech provedena řada požárních zkoušek a testů, které poskytly informace o průběhu požáru v tunelu a umožnily zejména projektování účinnějších systému havarijního větrání. Většina těchto experimentů sledovala zejména tvorbu kouře a jeho pohyb při požáru v tunelu, protože kouř a zplodiny hoření jsou hlavní příčinou obětí na životech. Dalšími sledovanými parametry u požárních zkoušek jsou vznikající teploty, rychlost vývinu tepla (tepelný výkon) a pravděpodobnost rozšíření požáru na ostatní vozidla. [10]

Rychlost vývinu tepla neboli tepelný výkon či tepelný tok je považován za jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících nebezpečí a závažnost požáru. V následující tabulce je uvedena korelační závislost vývinu tepla na energetickém obsahu hořlavých látek ve vozidle. [10]

tabulka 11: Relace mezi energetickým obsahem a maximální hodnotou tepelného toku hořícího vozidla v silničním tunelu [10]

Vozidlo	Energetický obsah [GJ]	Maximální hodnota tepelného toku TT_{max} [MW]	Průměrná hodnota tepelného toku TT [MW]	Doba do dosažení TT_{max} [min]
Osobní automobil (malý, velký)	2 - 8	1,5 – 8,5	4,1	10 – 38
2x osobní automobil	5 - 10	5,6 - 10	7,6	13 – 55
Autobus	41	29 – 30	29,5	7 – 8
Nákladní automobil	10 - 244	13 - 202		8 - 18

Teploty se během požárních zkoušek snímají pomocí termočlánků, které jsou rozmístěny v určitých výškách a vzdálenostech od tepelného zdroje. Hustota tepelného toku je snímána pomocí radiometrů. Dále jsou v tunelu při požárních zkouškách instalovány analyzátory a detektory plynů, pomocí nichž je měřena koncentrace plyných zplodin hoření a úbytek kyslíku. [10]

6.1 Videozáznam

Pohyb kouře a jeho stratifikace může být sledován pomocí kamer, které jsou umístěny v určité vzdálenosti od zdroje zkušebního požáru. Na základě získaného videozáznamu se vyhodnotí jakou rychlostí se kouř šíří a výška kouřové vrstvy.

6.1.1 Záznam videosekvencí

Transformace trojrozměrných objektů na dvojrozměrné záznamy ve formě videosekvencí je vhodným způsobem k získání podkladů pro zpracování vizualizačních experimentů. V oblasti záznamů videosekvencí se může použít filmový záznam, ale v dnešní době se častěji aplikují analogové a digitální videozáznamy. [24]

Analogový videozáznam je velice rozšířeným způsobem záznamu dynamických vizualizačních experimentů. Záznam se získává pomocí videokamery, která zobrazuje trojrozměrné pohyblivé objekty pomocí objektivu na obrazový snímač, který spolu s elektronickým vybavením kamery umožní zaznamenat na magnetický pásek videorekordéru dvojrozměrné černobílé nebo barevné videozáznamy. Před dalším zpracování videozáznamu je třeba analogový videozáznam digitalizovat. Digitalizace se provádí většinou pomocí vhodných počítačových digitalizačních karet, které umožňují různé vstupy videosignálů. [24]

Digitální videozáznam je dnes již asi nejpoužívanějším způsobem záznamů dynamických vizualizačních experimentů. Získává se pomocí digitální videokamery, která zaznamenává digitální videosekvence buď na digitální videokazetu zakládanou do kamery, nebo na disk externího DVD rekordéru. Videosekvence lze přímo zaznamenávat nebo také dodatečně přehrávat do počítače. Vzniklý soubor je pak vhodný pro další zpracování a vyhodnocení videosekvencí. [24]

6.1.2 Videodetekce

Pomocí kamer v tunelu je možné za provozu detekovat vznik požáru nebo mimořádné události.

Nespornou předností systémů videodetekce je možnost využití stacionárních kamer, které jsou součástí standardního videodohledu v tunelu. Výstupy videodetekčního zařízení přímo aktivují alarmy v řídicím systému, což je spojeno se spuštěním nahrávání příslušné kamery. [18]

Předností videodetekce je rychlá detekce požárů, která může doplnit více tradiční techniky jako například teplotní senzory. Výhodou tohoto typu detekce je, že nemusí

vzniknout teplo, aby byl požár detekován. Detekce funguje na automatickém vyhodnocení snímků, které je funguje na principech následujících metod [20]:

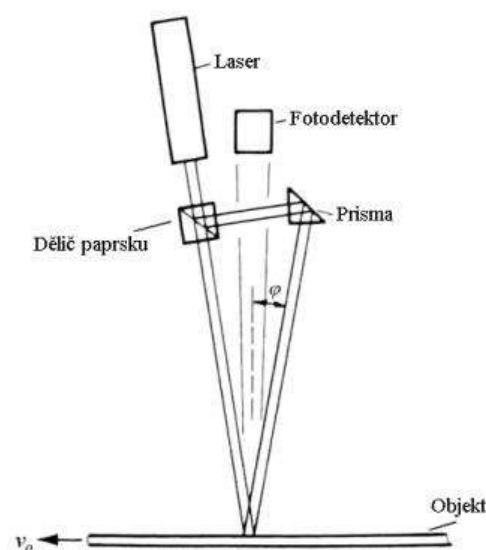
1. Metoda založená na vytvoření histogramu ze získaného snímku. Informace získané z vytvořeného histogramu slouží k vyhodnocení, jedná-li se o kouř či požár nebo ne. Principem metody je porovnání získaného histogramu s předem nastaveným histogramem typických případů. Jiným postupem může být využití statistických výpočtů, jako je průměrná nebo standardní odchylka, k určení pravděpodobnosti vzniku požáru. [20]
2. Metoda porovnávající jednotlivé snímky jdoucí za sebou. Principem je hledání rozdílů mezi nimi a vyhodnocení přítomnosti kouře nebo požáru. Některé z postupů využívají informace o barevném spektru snímku ke klasifikaci a identifikování kouřových objektů. [20]
3. Metoda, která využívá k porovnání snímků zakódované informace pro sledovaný úsek. K vyhodnocení kombinuje postupy předcházejících dvou metod. [20]
4. Metoda pracující na principu vyhodnocení změny kontrastu jasů bodů zobrazovaného obrazu. Ke změně kontrastu jasu dochází díky neprůhledné masě kouře. [19]

6.2 Laserové anemometry

Laserová anemometrie je velmi přesná a progresivní měřicí metoda pro měření rozložení rychlostí v tekutinách. Metoda je založena na principu Dopplerova jevu a anemometry se tedy označují LDA (Laser Doppler anemometer). [24] Tato metoda se osvědčila jako velmi výhodná pro měření rychlosti proudícího vzduchu nebo kapaliny. [25]

6.2.1 Princip metody

Paprsek laseru procházející tekutinou je na částicích v tekutině rozptylován. Rychlost částice způsobuje, že rozptýlené světlo je frekvenčně posunuto. Kombinací rozptýleného světla s nerozptýleným, popř. kombinací světla ze dvou dopadajících paprsků, dochází k interferenčnímu jevu. Výsledná frekvence f_D (Dopplerova frekvence) je přímo úměrná rychlosti částice.



Obrázek 3: Princip dopplerovského dvousvazkového měřiče rychlostí [25]

Protože částice jsou malé, sledují jakékoliv zrychlení tekutiny a tak rychlost částice je stejná jako rychlost tekutiny v_0 . [1]

Určení frekvence f_D , tedy i rychlosti pozorovaného objektu vychází ze vztahu [25]:

Rovnice 2: Výpočet dopplerovské frekvence [25]

$$f_D = 2f_s \cdot \frac{v_0}{c} \cdot \sin \varphi = 2 \frac{v_0}{\lambda_L} \cdot \sin \varphi$$

kde f_s ... frekvence světelného paprsku

λ_L ... vlnová délka světelného paprsku

c ... rychlost šíření světla ($3 \cdot 10^8$ m/s)

φ ... úhel, který svírá zdroj záření s fotodetektorem

Z rovnice vyplývá, že rychlost v_0 je dána vztahem:

Rovnice 3: Vztah pro výpočet rychlosti v_0 [1]

$$v_0 = \frac{\lambda_L}{2 \cdot \sin \varphi} \cdot f_D$$

Podle způsobu zpracování laserového paprsku rozlišujeme různé modely LDA:

- **Metoda referenčního paprsku** – rozptýlené světlo dopadá do detektoru zároveň s referenčním paprskem. Tento způsob je choulostivý na přímé nasměrování paprsků dopadajících do detektoru. Používá se při vysoké koncentraci částic v měřeném vzorku. [1]
- **Diferenciální metoda s průchodem rozptýleného paprsku** – rozptýlené světlo dvou paprsků stejné intenzity dopadá mimo otvor clony fotodetektoru. Metoda bývá nazývána také jako „fronte mode“, protože paprsky vytvářejí v měřeném objemu interferenční proužky. Rozptýlené světlo může být zachyceno pod širokým úhlem, protože diferenciální metoda je nezávislá na směru detekce. V praxi je tato metoda nejvyužívanější, protože interferenční jev umožňuje konstrukci digitálních měřících přístrojů. [1]
- **Diferenciální metoda se zpětným odrazem rozptýleného paprsku** – metoda výhodná v případě, kdy je možno měřit jen z jedné strany. Principem je shodná s předchozí metodou. Nevýhodou uspořádání je, že je nutno použít laser o vysoké energii i v případě, že proudící prostředí obsahuje vysokou koncentraci částic způsobujících rozptyl světla. [1]

- **Metoda dvojitého rozptýleného paprsku s průchodem** – umožňuje měření dvou nebo tří složek rychlostí, protože dovoluje usměrnění světla do dvou nebo tří směrů. [1]
- **Metoda dvojitého rozptýleného paprsku s odrazem** – při této metodě je laser i fotonásobič umístěn na jedné straně proudícího média a umožňuje rovněž snadná měření ve dvou nebo třech směrech. Podobně jako diferenciální metoda s odrazem rozptýleného paprsku, vyžaduje použití laseru s vysokou energií. [1]

V tunelu se využívá i metoda ultrazvukové anemometrie. Funguje na principu změny rychlosti ultrazvuku šířícího se mezi zdrojem a přijemcem, která je způsobena rychlostí proudícího média, přes které ultrazvuk prochází. Využívá rovněž Dopplerova jevu.

6.3 Fotometrické měření kouře

Pro efektivnější sledování výšky kouřové vrstvy by se v tunelu mohlo využít fotometrické měření. Latě, na kterých jsou upevněné fotometry se umístí v daných vzdálenostech od zdroje zkušebního požáru (např. každých 10 metrů) ve směru šíření kouře a sleduje se zeslabení intenzity světelného paprsku při průchodu kouře. Fotometry se mohou umístit do různých výšek, a tím pádem je možné odečítat výšku kouřové vrstvy nad vozovkou.

6.4 Výsledky reálných zkoušek

6.4.1 Požární zkoušky v tunelu Valík

Tunel Valík je hlavním objektem obchvatu města Plzně, který je součástí dálnice D5 Praha – Rozvadov. Je to jednosměrný tunel s dvěma tunelovými troubami, jeho délka je 390 metrů. Požární zkoušky v tunelu Valík byly realizovány v květnu roku 2006. [10] Byly provedeny zkoušky studeným a teplým kouřem.

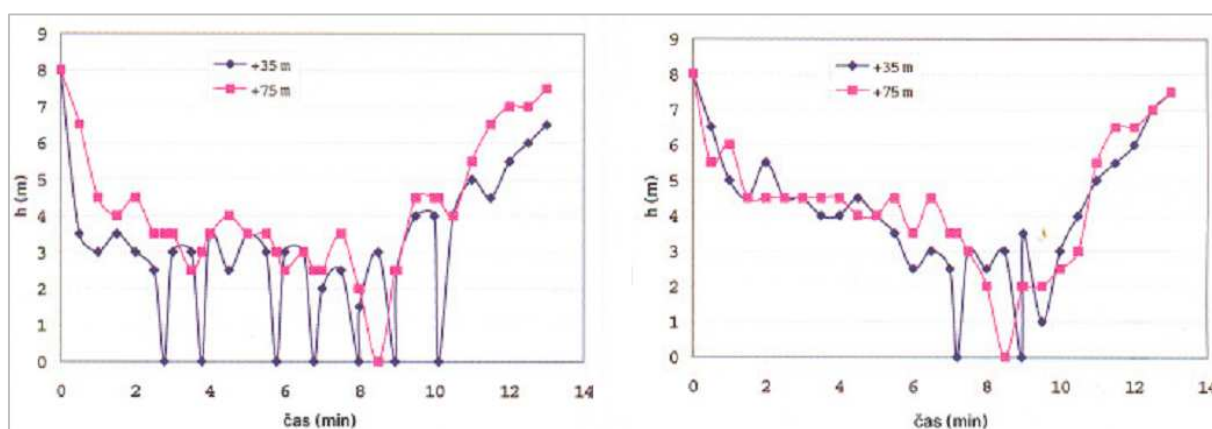
Zařízení na výkon studeného kouře poskytovalo výkon $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Vývin kouře nebyl spojitý, nýbrž cyklický. [9] U zkoušek se studeným kouřem chybí vztlakový efekt při požáru, tudíž nemohou být všechny výsledky zkoušek směrodatné. Cílem těchto zkoušek bylo prokázat nebo vyloučit možnost ověřování funkčnosti požárně bezpečnostních zařízení (zejména ventilace) před jejich uvedením do provozu s využitím studeného kouře a taky tedy s minimálními náklady. [10]

Během požárních zkoušek byly provedeny dvě reálné zkoušky simulující požár o tepelném výkonu 5 MW (hoření 170 litrů automobilového benzínu v otevřené nádrži o ploše 4 m²). Při experimentu byly hodnoceny následující parametry požáru [10]:

- Teplotní pole plynů ve svislé rovině
- Teplotní pole na ostění tunelu
- Teplotní pole v bezprostředním okolí plamene
- Hustota tepelného toku
- Rychlost šíření a pokles vrstvy kouřových plynů
- Optická hustota kouře
- Koncentrace vybraných toxikantů
- Rychlosti proudění vzduchu
- Meteorologická situace na portálech tunelu

Pohyb kouře a jeho stratifikace v prostoru byl sledován kamerami umístěnými ve vzdálenostech +35 m a +75 m od tepelného zdroje. Z natočeného videozáznamu byly posouzeny sledované parametry. Výsledky měření viz obr.2. [10]

Obrázek 4: Tvorba horké vrstvy kouře v průběhu zkoušky č.1 a č.2 [10]



6.4.2 Požární zkouška v tunelu Mrázovka

Požární zkoušky byly provedeny v tunelu Mrázovka ve dnech 13. – 15. srpna 2004. U všech zkoušek byl simulován požár osobního automobilu o výkonu 2,5 – 5 MW (40 litrů benzínu a 10 l nafty v plechové vaně o ploše 2 m²). Zkoušky byly provedeny v třípruhové a dvoupruhové části tunelu. [17]

Účelem požární zkoušky bylo ověřit navržený systém větrání, rychlost detekce požáru elektrickou požární signalizací apod. [17]

Během zkoušek byl ověřen požadavek detekce vzniku požáru do 1 minuty (při všech zkouškách byl požár automaticky detekován mezi 55. a 60. sekundou). I hned po detekci bylo spuštěno požární větrání. [17]

Nejvyšší teploty kouře detekované teplotním kabelem se pohybovaly u zkoušky v třípruhové části v rozmezí 60 – 70 °C a při zkoušce v dvoupruhu v rozmezí 80 – 90 °C (v místě ohniska požáru v klenbě raženého třípruhového tunelu se předpokládá nejvyšší teplota kouře přibližně 250 °C). Kouř se při těchto podmínkách držel při stropu tunelu. V třípruhové ražené části došlo k výraznému vyplnění prostoru tunelu z důvodu nízkých teplot kouřové vlečky a rychlého chladnutí velice zředěného kouře v profilu tunelu. Ve dvoukruhové hloubené části tunelu kouře vytvořil pod stropem stratifikovanou vrstvu, která se po celou dobu hoření nikdy neochladila natolik, že by kouř začal vyplňovat prostor pod výškou 2 metry, což představuje hranici únikové zóny. [17]

7 ZÁVĚR

Způsob jakým se kouř v tunelu při požáru šíří je závislý na nasazení ventilace nebo typu větrání jaké je v tunelu instalováno. U tunelů s přirozenou ventilací je velké riziko, že dojde k zpětnému toku požárních plynů, což může být nebezpečné jak pro unikající osoby, tak pro zasahující hasiče.

Dalším důležitým faktorem, který má vliv na šíření kouře je sklon tunelu. Při velkém sklonu tunelu dochází ke komínovému efektu a kouř se šíří směrem vzhůru. Nebezpečí nehrozí tedy jenom osobám nacházejícím se v tunelu, ale i lidem, kteří se vyskytují u ústí tunelu, hlavně ústí-li tunel do uzavřeného prostoru. Typickým příkladem této situace byl požár v železničním tunelu lanovky na ledovec Kaprun.

Nejefektivnější a nejpoužívanější metodou pro sledování šíření kouře při zkouškách v tunelech je metoda videozáznamu. Ze získaného videozáznamu se vyhodnotí šíření kouře v čase a velikost kouřové vrstvy. Z údajů se následně zpracovávají grafické modely, které jsou doplněné o teplotní údaje získané z měření v tunelu pomocí termočlánků.

Pro měření rychlosti proudění vzduchu je osvědčené použití anemometrů založených na principu Dopplerova jevu.

Další metody měření používané při reálných zkouškách v tunelech by mohly být námětem pro zpracování diplomové práce.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. AMROS, František. *Experimentální metody a technika*. 2. vyd. Praha : ČVUT, 1993. 155 s. ISBN 80-01-00972-6.
2. BEARD, Alan, CARVEL, Richard. *The handbook of tunnel fire safety*. 1st edition. London : Thomas Telford publishing, 2005. 514 s. ISBN 0 7277 3168 8.
3. BEBČÁK, P., ŠENOVSKÝ, M., PROKOP, P. *Větrání objektů*. 2. aktualizované vydání. Ostrava: SPBI, 2007. 203 s. ISBN 978-80-7385-008-1
4. BRADÁČOVÁ, Isabela. Vývin kouře při požáru. In ŠENOVSKÝ, Michail. *Požární ochrana '99 : Mezinárodní konference*. 1999. vyd. Ostrava : SPBI, 1999. I. díl. s. 43-51. ISBN 80-86111-36-9.
5. BRUMOVSKÁ, Irena. *Speciální chemie pro požární ochranu*. Učební texty. 2. vydání. Praha: MV- Ředitelství HZS ČR, UNIAPRESS, 1995. 75 s.
6. FILIPI, Bohdan. *Nauka o materiálu*. 1. vyd. Ostrava : SPBI, 2003. 124 s. ISBN 80-86634-11-6.
7. GRANT, G.B., JAGGER, S.F., LEA, C.J. Fires in tunnels. *Philosophical transactions of the Royal Society : Mathematical, physical & engineering sciences*. 1998, vol. 356, no. 1748, s. 2873-2906. Dostupný z WWW:
<<http://journals.royalsociety.org/content/g4v1c24u92t21a0q/>>.
8. INGASON, Haukur. Design fires in tunnels. In *2nd International symposium safe and reliable tunnels*. Lausanne : [s.n.], 2006. s. 1-11. Dostupný z WWW:
<www.uptun.net>
9. KOLEKTIV AUTORŮ. Základní poznatky ze zkušebního požáru v tunelu. [online]. 2006 [cit. 2008-03-01]. Dostupný z WWW:
<www.cideas.cz/free/okno/technicke_listy/3tlv/TL06CZ_2212-6.pdf>.
10. KOLEKTIV AUTORŮ. Požární zkoušky v silničním tunelu Valík. *112 : Příloha*. roč. 2007, č. 5, 12 s.
11. KREPELKA, F., ZÁHORANSKÝ, G. a kol. *Tunely*. 1. vydání. Košice : AMS, F BERG, TU, 2006. 396 s. ISBN 80-8073-591-3.
12. KVARČÁK, M., BALOG, K. *Dynamika požáru*. 1. vydání. Ostrava: SPBI, 1999. 118 s. ISBN 80-86111-44-X
13. KVARČÁK, Miloš. *Základy požární ochrany*. 1. vydání. Ostrava: SPBI, 2005. 135 s. ISBN 80-86634-76-0

14. MV ČR, GR HZS. *Bojový řád jednotek požární ochrany : Metodický list č. 8: Zásah v silničním tunelu*. Praha : [s.n.], 2006. 5 s. Dostupný z WWW: <http://www.mvcr.cz/hasici/izs/bojrad/index_hasici.html>.
15. ORLÍKOVÁ, K., DANIHELKA, P., KOZUBEK, E. *Chemie hořlavin a produktů hoření*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TUO, 1991. 101 s. ISBN 80-7078-036-3
16. ORLÍKOVÁ, Kateřina, ŠTROCH, Petr. *Chemie procesů hoření*. 1. vydání. Ostrava: SPBI, 1999. 86 s. ISBN 80-86111-39-3
17. POŘÍZEK, Jan. Požární zkouška v tunelu Mrázovka. *Tunel*. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 40-44. Dostupný z WWW: <<http://www.ita-aites.cz/showdoc.do?docid=1655>>.
18. PŘIBYL, Pavel. *Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací : Technické podmínky*. 2. upr. vyd. [s.l.] : MD - OPK, c2003. 140 s. ISBN 80-239-0110-9.
19. PŘIBYL, Pavel, JANOTA, Aleš, SPALEK, Juraj. *Analýza a řízení rizik v dopravě : Tunely na pozemních komunikacích a železnici*. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2008. 528 s. ISBN 978-80-7300-214-5.
20. WIESER, Dieter, BRUPBACHER, Thomas. Smoke detection in tunnels using video images. In BEALL, Kellie, GROSSHANDLER, William, LUCK, Heinz. *AUBE '01 : 12TH International conference on automatic fire detection*. Gaithersburg, Maryland U.S.A. : NIST, 2001. s. 1-12. Dostupný z WWW: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/>>.
21. ZAPLETALOVÁ - BARTLOVÁ, Ivana. Rizika toxického působení zplodin hoření. *150 - HOŘÍ*. 1998, roč. 98, č. 10, s. 3-15. Příloha.

Internetové zdroje:

22. *FIT : Fires in tunnels* [online]. Monday, October 29, 2007 [cit. 2008-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.etnfit.net/>>
23. MINISTERSTVO, Vnitřní. *Ministerstvo vnitra : Hasiči záchránáři* [online]. 15. března 2000 [cit. 2008-04-12]. Odborná příprava jednotek požární ochrany - Konspekty odborné přípravy. Dostupný z WWW: <http://www.mvcr.cz/hasici/izs/konspekty/produkth_hasici.html>.
24. PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E.. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. Brno : VUT Fakulta strojního inženýrství Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2007 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/index.htm>>.
25. PROKEŠ, Aleš, ČERMÁK, Karel. Metody pro měření podélné a transversální rychlosti. *Elektrorevue* [online]. 2003, roč. 2003, č. 8 [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03008/index.html>>.